

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

JULIANA VITÓRIO PAIM

**APLICAÇÃO DO BIOGÁS PRODUZIDO A PARTIR DE DEJETOS DE GADO
LEITEIRO COMO FONTE ALTERNATIVA DE ENERGIA EM UMA
QUEIJARIA**

Araranguá, SC

2018

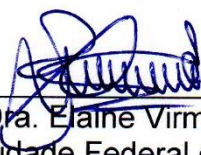
JULIANA VITÓRIO PAIM

**APLICAÇÃO DO BIOGÁS PRODUZIDO A PARTIR DE DEJETOS DE
GADO LEITEIRO COMO FONTE ALTERNATIVA DE ENERGIA EM
UMA QUEIJARIA**

Trabalho de Conclusão de Curso,
apresentado à Universidade Federal de
Santa Catarina, como parte das
exigências para a obtenção do título de
Engenheiro(a) de Energia.

Araranguá, 29 de novembro de 2018.

BANCA EXAMINADORA



Profa. Dra. Elaine Virmond (Orientadora)
Universidade Federal de Santa Catarina



Profa. Dra. Regina Vasconcellos Antônio
Universidade Federal de Santa Catarina



Profa. Dra. Tatiana Gisset Pineda Vázquez
Universidade Federal de Santa Catarina

APLICAÇÃO DO BIOGÁS PRODUZIDO A PARTIR DE DEJETOS DE GADO LEITEIRO COMO FONTE ALTERNATIVA DE ENERGIA EM UMA QUEIJARIA

Juliana Vitório Paim¹

RESUMO

O biogás é um biocombustível cuja aplicação energética requer caracterização em termos de composição (CH_4 , CO_2 , NH_3 , H_2S), poder calorífico, número de Wobbe, pressão do gás, dentre outros, sendo esses fatores dependentes do tipo de sistema de biodigestão utilizado e das condições de operação. O presente trabalho analisou a composição química e energética do biogás proveniente de um biodigestor construído no âmbito do primeiro projeto do TsF Brasil em uma propriedade rural localizada em Araranguá/SC visando à aplicação do biogás na substituição parcial do gás liquefeito de petróleo (GLP) na queijaria anexa ao biodigestor. O biogás, além de conter baixas concentrações de ácido sulfídrico (40 ppmV) apresentou concentração de amônia 175 ppmV, PCI de 25,42 MJ/m³ e índice de Wobbe de 27,88 MJ/Nm³. O teste preliminar de combustão indicou boa qualidade do biocombustível produzido pois mesmo sem qualquer controle das variáveis do processo de combustão dada a simplicidade do sistema utilizado, coloração azulada da chama e redução da concentração de CH_4 de 71% para 1,34% foram observados, atingindo-se a temperatura máxima de 700 °C no ponto de amostragem. Portanto, o biogás produzido no sistema e nas condições avaliadas tem potencial para substituição parcial do GLP na aplicação em questão.

Palavras-chave: Biodigestor; Biogás; Substituição do GLP.

¹Graduanda do Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde – CTS, Campus Araranguá, Rodovia Governador Jorge Lacerda, 3210, Jardim das Avenidas, Araranguá, Santa Catarina, Brasil, CEP 88906-072. E-mail: julianavitoriop@gmail.com.

1 INTRODUÇÃO

A Agência Nacional do Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), na Resolução ANP N° 8 DE 30/01/2015 (BRASIL, 2015), define biogás como o gás bruto obtido da decomposição biológica de produtos ou resíduos orgânicos. A decomposição biológica de matéria orgânica biodegradável, de origem animal, vegetal ou derivada desses (biomassa) constitui o processo de digestão anaeróbica ou biodigestão, que deve ser realizado em sistemas adequadamente projetados e operados (biodigestores) visando à produção otimizada de biogás e coprodutos, tal como o fertilizante orgânico.

A oferta interna de biogás vem crescendo no Brasil, passou de 15 mil toneladas equivalentes de petróleo (tep) em 2010 para 137 mil tep em 2016 (COELHO, 2017). De acordo com Biasi e colaboradores (2018), a região sul do Brasil tem amplo potencial para produção de biogás devido à geração de resíduos, concentrada em algumas regiões, que são efluentes das atividades agropecuárias, principalmente a suinocultura, bovinocultura de leite e avicultura.

Classificado como o quarto maior produtor mundial de leite, o Brasil produziu 33,6 milhões de toneladas no ano de 2016 (FAO, 2018). Segundo projeções do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), a produção de leite deverá crescer até 2028 a uma taxa anual entre 2,1% e 2,9% aumentado de 35,3 bilhões de litros estimados para 2018 para valores entre 43,4 e 48,1 bilhões de litros no final do período das projeções (BRASIL, 2018a). No ano 2017, cerca de 38% do volume de leite produzido no país vieram da região sul do Brasil. As expectativas são de que até 2025 a região produza mais da metade de todo o leite brasileiro. A produção de Santa Catarina aumentou 92% nos últimos 11 anos devido a investimentos na vocação e às condições favoráveis (clima e topografia). Associado ao aumento da produção animal está o aumento da produção de dejetos (mistura de esterco e urina), que tem grande potencial poluidor.

Uma vaca leiteira de 453,6 kg produz em média 50,3 kg de dejetos por dia. A biodigestão representa uma forma eficaz de tratamento dos efluentes da produção bovina confinada, em pastagens ou qualquer cultura, podendo contribuir para reduzir a emissão dos gases de efeito estufa (BRASIL, 2018b) dado que quando disposto a céu aberto esses resíduos liberam tais gases durante sua degradação natural.

A biodigestão é um processo anaeróbico composto por quatro fases, sendo essas hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Na hidrólise as ligações que formam

os constituintes complexos da matéria-prima tais como carboidratos, proteínas e gorduras são quebradas por intermédio de enzimas em um processo bioquímico, sendo essas produzidas e liberadas por um grupo específico de bactérias, dando origem à monômeros como aminoácidos, ácidos graxos e açúcares. Na acidogênese as substâncias resultantes da hidrólise são transformadas por bactérias acidogênicas em ácido propanóico, ácido butanóico, ácido láctico e álcoois, assim como hidrogênio e gás carbônico. A formação de produtos nessa fase também depende da quantidade de hidrogênio dissolvido no meio reacional. Quando a concentração de hidrogênio é muito alta, essa interfere negativamente na eficiência da acidogênese, o que causa o acúmulo de ácidos orgânicos. Com isso, o pH da mistura é reduzido e o processo é afetado. A acetogênese é a fase na qual os materiais resultantes da acidogênese são transformados em ácido etanóico, hidrogênio e gás carbônico por bactérias acetogênicas. Durante a metanogênese o ácido acético, o hidrogênio e dióxido de carbono são finalmente convertidos em metano e gás carbônico por meio da ação de microrganismos metanogênicos classificados no domínio das archeas (ARAÚJO, 2017). O volume e a qualidade do biogás produzido nesse processo depende, portanto, das condições em que essas etapas se desenvolvem.

1.1 Caracterização química, energética e aplicação do biogás

A aplicação energética do biogás, no Brasil, se divide em 49% na geração de energia térmica e 44% na geração de energia elétrica, o restante é dividido entre energia mecânica e produção de biometano (GAHB, 2017). Para Biasi e colaboradores (2018) os resultados econômicos do biogás são analisados de maneira direta pela aplicação na geração de energia, tanto para autoconsumo quanto comercialização, e de maneira indireta em termos de redução de emissões de gases do efeito estufa, eficiência energética, demandas por serviços de planejamento, implantação, operação e manutenção dos processos que produzem o biogás e da energia útil que dele pode ser obtida.

Para aplicação do biogás como biocombustível, é recomendável a verificação das Normas Brasileiras Regulamentadoras (NBR), as quais são estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Cabe salientar que não existem NBRs que tratem especificamente do tema biogás, entretanto, com as devidas observações e correções, sendo algumas dessas em termos da limpeza do gás, análise da concentração de metano, verificação do número de Wobbe e da pressão do gás, pode-se adotar de forma parcial as normativas referentes ao gás natural (BRASIL, 2016). Ressaltam-se as seguintes normas:

ABNT NBR 15358 – Rede de distribuição para gás combustível em instalações de uso não residencial até 400 kPa; ABNT NBR 15590 – Regulador de pressão para gases combustíveis e ABNT NBR ISO 6184 – Sistema de proteção contra explosões.

Santa Catarina possui a resolução do CONSEMA 98/17 (SANTA CATARINA, 2017), a qual regulamenta a produção e a utilização do biogás com finalidades energéticas e a Lei nº 17.542 que institui a Política Estadual do Biogás, apresentando diretrizes, instrumentos e incentivos com vistas à produção, à exploração, ao gerenciamento e à comercialização de biogás (SANTA CATARINA, 2018b). A resolução CONSEMA 98/17 (SANTA CATARINA, 2017) classifica o potencial poluidor da atividade de biodigestão de resíduos em função de suas características intrínsecas, a unidade de produção de gás e biogás com ou sem aproveitamento energético tem seu potencial poluidor/degradador classificado em porte médio para ar, pequeno para a água, pequeno para o solo e em médio para o geral.

A caracterização do biogás é o primeiro passo visando sua aplicação energética. A caracterização de uma mistura gasosa combustível se dá em termos de determinação da vazão volumétrica, da temperatura e da composição. Para a determinação da composição do biogás, diversos sistemas de amostragem e análise podem ser empregados para quantificar os diferentes componentes do biogás (CH_4 , CO_2 , NH_3 , H_2S , CO , H_2 , N_2 , outros), tais como sistemas de cromatografia gasosa indicados, por exemplo, nas normas NBR 16560, NBR 16561, NBR 16562 e ISO 20675 (ABNT, 2016, 2017a, 2017b, 2018). No entanto, em pequena escala de produção o custo da caracterização do biogás é determinante da sua viabilidade. Nesse sentido, é interessante que se disponha de sistemas de análise rápida, de baixo custo, e cuja caracterização possa ser realizada no próprio local por pessoal não especializado, tais como produtores rurais, por exemplo.

Conhecida a composição molecular do combustível é possível estimar os valores de PCS e de PCI, em kJ/Nm^3 , por meio da aplicação das fórmulas de Dulong apresentadas na Equação 1 e na Equação 2 (BRASIL, 2016).

$$PCS = 3.050 \times CO + 3.070 \times H_2 + 9.500 \times CH_4 + 13.950 \times C_2H_2 + 15.000 \times C_2H_4 \quad (1)$$

$$PCI = 3.050 \times CO + 2.580 \times H_2 + 8.530 \times CH_4 + 13.500 \times C_2H_2 + 14.050 \times C_2H_4 \quad (2)$$

Onde CO é o teor de monóxido de carbono ($\text{Nm}^3 \text{ CO}/\text{Nm}^3 \text{ combustível}$); H_2 é o teor de hidrogênio ($\text{Nm}^3 \text{ H}_2/\text{Nm}^3 \text{ combustível}$); CH_4 é o teor de metano ($\text{Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{Nm}^3 \text{ combustível}$); C_2H_2 é o teor de etino ($\text{Nm}^3 \text{ C}_2\text{H}_2/\text{Nm}^3 \text{ combustível}$); C_2H_4 é o teor de eteno ($\text{Nm}^3 \text{ C}_2\text{H}_4/\text{Nm}^3 \text{ combustível}$) (BRASIL, 2016). No entanto, os resultados dessas equações são dependentes da determinação da concentração de cinco componentes do gás, sendo esse um fator limitante desse método.

Alternativamente, é possível determinar o PCI a partir da concentração de metano apenas por meio da sua reação de combustão, representada na reação química 1, e da Equação 3 adaptada porá partir de Hilsdorf (2015).



$$\text{PCI} = \frac{G \cdot 1000}{22,4} * h_G \quad (3)$$

Na Equação 3, G é a porcentagem de metano no gás em análise; h_G é a entalpia de combustão do metano, no valor de -802 kJ/mol nas condições de 25°C e 1 atm , tal como descrito por USP (2006).

Dentre as possíveis aplicações do biogás, a mais difundida é a substituição parcial ou total de gases combustíveis em sistemas de aquecimento e cocção. Fogareiros domésticos de cocção a gás comercializados, são regulados pela norma ABNT NBR 13273 (ABNT, 2003) sendo que os gases são classificados em três famílias: gases manufaturados, gás natural e gás liquefeito de petróleo (GLP), de acordo com o valor de seus números de Wobbe, a 15°C e $101,33 \text{ kPa}$.

O índice de Wobbe (I_w), expresso na Equação 4, é utilizado para determinar características técnicas dos equipamentos e a sua regulação face ao gás que os alimentará. É determinado pelo quociente entre o PCI e a raiz quadrada da densidade relativa (quociente entre a densidade do gás combustível e a densidade do ar seco nas mesmas condições de pressão e temperatura) (IEA Bioenergy, 2013).

$$I_w = \frac{\text{PCI}}{\sqrt{\text{densidade relativa}}} \quad (4)$$

Gases com o mesmo número de Wobbe vão apresentar o mesmo desempenho energético, conferindo a mesma taxa de transferência de calor ou potência energética.

A Tabela 1 apresenta características do gás GLP e do gás natural, usualmente comparados ao biogás, nas condições de ensaio a 15 °C e 101,33 kPa. Na Tabela 2, faz-se a comparação entre esses três gases combustíveis considerando-se uma composição típica do biogás.

Tabela 1 - Características do gás liquefeito de petróleo.

Gás/ família	Designação	Composição em volume (%)	PCS MJ/m³ (kcal/m³)	Índice de Wobbe MJ/m³ (kcal/m³)	Densidade relativa de massa (ar = 1)
Gás Natural/ segunda família	G20	N ₂ (2), CH ₄ (90), C ₃ H ₈ (2), C ₂ H ₆ (6)	39,87 (9524)	50,98 (12176)	0,6118
	G21	CH ₄ (86), C ₃ H ₈ (7), C ₂ H ₆ (6), N ₂ (1)	43,09 (10292)	53,18 (12702)	0,6565
	G22	H ₂ (10), CH ₄ (82), C ₃ H ₈ (3), C ₂ H ₆ (5)	38,33 (9154)	51,23 (12237)	0,5597
Gás GLP/ terceira família	G30	C ₄ H ₁₀ (100)	126,21 (30144)	87,54 (20908)	2,0788
	G31	C ₃ H ₈ (100)	95,65 (22846)	76,84 (18353)	1,5497
	G32	C ₃ H ₆ (100)	88,52 (21142)	72,86 (17402)	1,4760

Fonte: ABNT (2003).

Tabela 2 - Comparação de propriedades de gás liquefeito de petróleo, gás natural e o biogás, nas condições de 101,33 kPa e 15 °C.

Propriedades	Gás Liquefeito de Petróleo	Gás Natural	Biogás
Composição em volume (%)	C ₃ H ₈ (30) C ₄ H ₁₀ (70)	CH ₄ (85)	CH ₄ (60)
		C ₂ H ₆ (7)	CO ₂ (30)
		C ₅ H ₆ (2)	CO (0,18)
		N ₂ (1)	H ₂ (0,18)
		CO ₂ (5)	
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	45,7	50	17
Densidade	2,26	0,79	1,2
Velocidade de chama (cm/s)	38,25	34	25

Fonte: Porpatham e colaboradores (2012).

A partir da observação da Tabela 1 constata-se que os índices de Wobbe são maiores para o GLP comparados ao gás natural. E na Tabela 2, as velocidades de chama do GLP, gás natural e biogás equiparam-se, o que apresenta a possibilidade de substituição entre eles dependendo do uso almejado.

De acordo com a norma ABNT NBR 13273 (ABNT, 2003), os aparelhos são classificados em categorias de acordo com os gases para os quais foram projetados, logo para se converter um aparelho de uma família de gás para outra família, recomenda-se conforme seja necessário: substituição de injetores, injetores de pilotos, regulador de pressão, registros, outros componentes do circuito de gás e regulação de admissão de ar primário, para se manter inalterado o desempenho do aparelho.

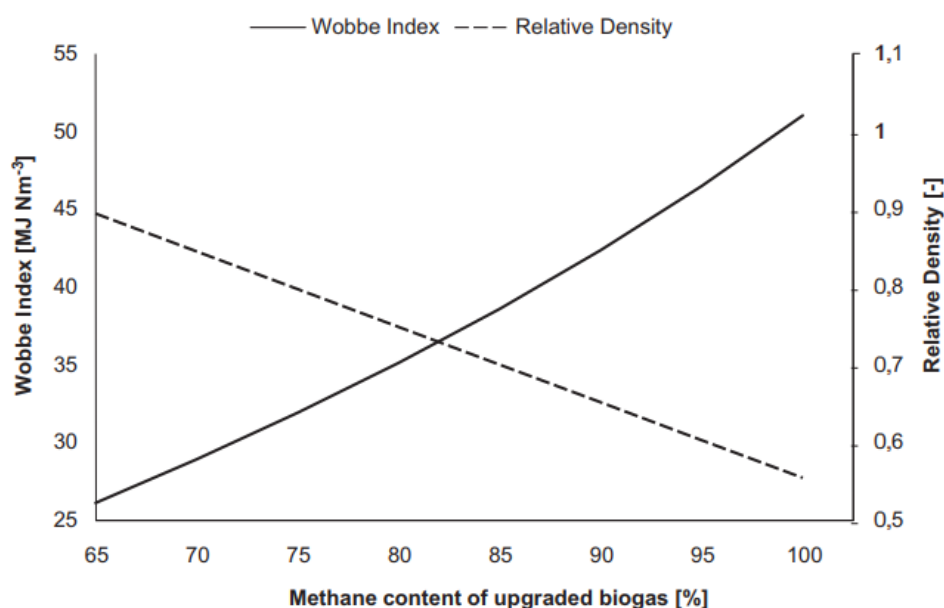
A normativa nacional chinesa (GB/T 13611-2006) propõe nomenclatura, propriedades e composições das combinações de biogás e GLP, todavia cada uma das misturas estipuladas tem o índice de Wobbe aproximadamente equivalente ao do gás natural dentro de um intervalo de erro relativo a 1% (DAI, 2010).

De acordo com Martins (2018), a porcentagem de metano presente no gás combustível é uma das grandes influências na ocorrência das substituições de componentes do fogão. Pode-se dividir em três principais ocorrências:

- Acima de 70% (v/v) e mais próximo de 100% (v/v) de metano na mistura há maior probabilidade do aparelho em questão funcionar com os mesmos injetores, válvulas, pressão de entrada e demais acessórios utilizados para funcionamento com gás natural;
- Abaixo de 70% (v/v) e acima de 50% (v/v) de metano na mistura há maior probabilidade de necessitar o desenvolvimento de um kit de conversão ou até mesmo um queimador próprio para aumentar a vazão de gás e reduzir a captação de ar primário ou secundário devido à redução do poder calorífico;
- Abaixo de 50% (v/v) de metano na mistura a viabilidade de queima contínua do gás e o cumprimento de todos os requisitos de segurança e funcionamento regulados pela norma ABNT NBR 13273 (ABNT, 2003) pode acabar tornando-se inviável.

Como pode ser observado na Figura 1, quanto maior a concentração de metano no gás maior será seu índice de Wobbe, sendo que índices maiores representam a maior quantidade de energia passível de ser gerada com um dado volume fixo de gás.

Figura 1 – Índice de Wobbe e a densidade relativa, em função da porcentagem de metano no gás.



Fonte: Ryckebosch e colaboradores (2011).

De acordo com IRENA (2017) a operação de fogões de cocção usando biogás, além de ser ambientalmente positiva, apresenta eficiência de combustão comparável ao gás liquefeito de petróleo (GLP) ou etanol. A equivalência energética do biogás em relação a outros energéticos é determinada levando-se em conta o poder calorífico e a eficiência média de combustão, sendo assim a equivalência energética de 1 m³ de biogás corresponde a 0,572 m³ de GLP (POMPERMAYER; JÚNIOR, 2003).

Todavia, geralmente não é possível aproveitar diretamente o biogás bruto, pois alguns de seus componentes podem ser prejudiciais ao processo de queima em dadas concentrações, podendo afetar a eficiência ou acarretar corrosão de componentes do sistema de conversão. Assim faz-se necessária, inicialmente, caracterização do biogás a fim de que se possa definir a necessidade de purificação conforme o uso pretendido (FNR, 2010).

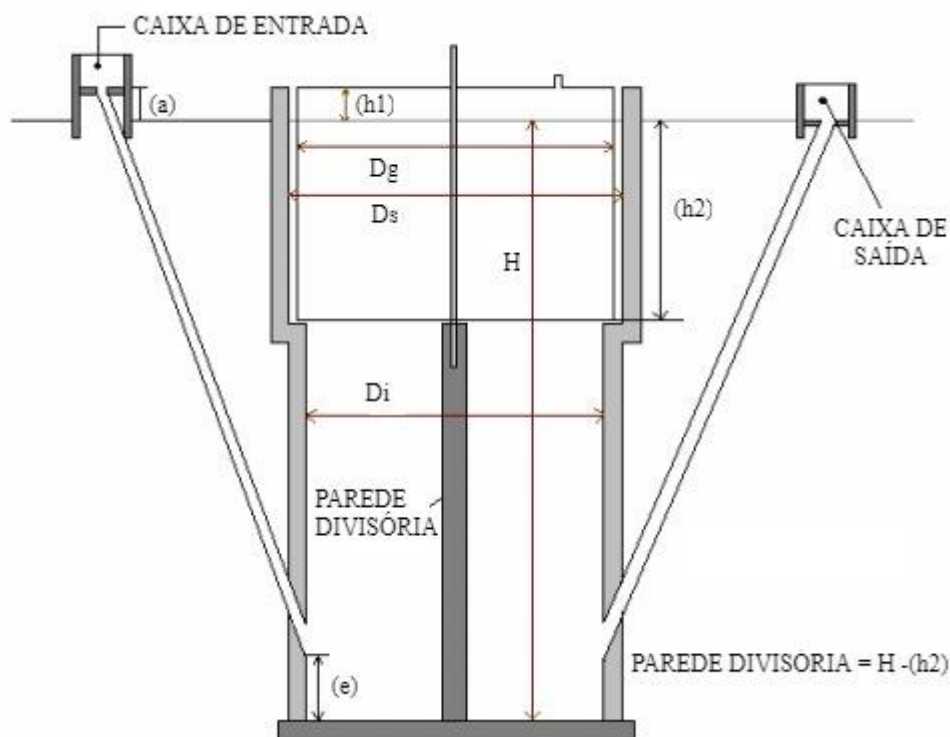
1.2 Objeto de estudo

O objeto de estudo deste Trabalho de Conclusão de Curso compõe parte integrante do primeiro projeto desenvolvido no período de dezembro de 2017 a dezembro de 2018 pela associação Técnica sem Fronteiras Brasil (TsF Brasil), uma associação de origem alemã trazida para o Brasil que tem como foco principal o desenvolvimento e aplicação de projetos de baixo custo que beneficiem a sociedade.

Nesse projeto, um biodigestor modelo indiano, tal como descrito em detalhes por Pereira (2018) e representado na Figura 2 e na Figura 3 a seguir, foi construído por estudantes da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e de outras instituições que fazem parte da TsF Brasil, Grupo Regional Araranguá, que contaram também com o apoio dos proprietários e de outros colaboradores.

O biodigestor foi instalado em uma propriedade rural localizada em Araranguá/SC, com área de cerca de 11 hectares que, além de ser residência dos proprietários do imóvel, executa atividades de plantação e silagem de milho para alimentação dos animais, criação de rebanho bovino leiteiro (30 vacas Jersey), ordenha das vacas e fabricação de queijo.

Figura 2 – Esquema representativo do biodigestor, modelo indiano. Onde H é o nível do substrato; Di é o diâmetro interno do biodigestor; Dg é o diâmetro do gasômetro; Ds é o diâmetro interno da parede superior; $h1$ é a altura ociosa (reservatório do biogás); $h2$ é a altura útil do gasômetro; a é a altura da caixa de entrada; e é a altura de entrada do tubo afluente.



Fonte: Deganutti e colaboradores (2002).

O biodigestor consiste de quatro componentes principais: reservatório de biomassa, reservatório de fertilizante orgânico, cúpula de gás (gasômetro) e tanque de fermentação. O tanque de fermentação foi construído abaixo do nível do solo, tendo em sua parte superior o acoplamento de um gasômetro, de material impermeável e rígido que retém o biogás. A parede divisória representada na figura 2 não foi implementada. As dimensões do biodigestor objeto de estudo são: $H = 2,05$ m (altura do nível do substrato); $Di = 2,10$ m (diâmetro interno do biodigestor); $Dg = 1,7$ m (diâmetro do gasômetro); $Ds = 2,10$ m (diâmetro interno da parede superior); $h1 = 20$ cm (altura ociosa, reservatório do biogás); $h2 = 1,70$ m (altura útil do gasômetro); $a = 60$ cm (altura da caixa de entrada); $e = 0,34$ cm (altura de entrada do tubo afluente). A Figura 3 ilustra o biodigestor em estudo.

Figura 3 – Foto do biodigestor.



Fonte: Autor (2018).

Há dois produtos advindo do biodigestor, o biogás (produto gasoso) e a mistura das frações sólida e líquida, amplamente utilizada como fertilizante orgânico agrícola por conter propriedades que contribuem para melhoria da qualidade do solo de plantas.

A fabricação de queijo ocorre em queijaria anexa ao biodigestor, sendo o uso pretendido do biogás para substituição parcial de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), combustível utilizado nas operações descritas no item 1.2.1. A demanda de gás combustível e a rede de suprimento de gás para a queijaria foram apresentadas no item 1.2.2.

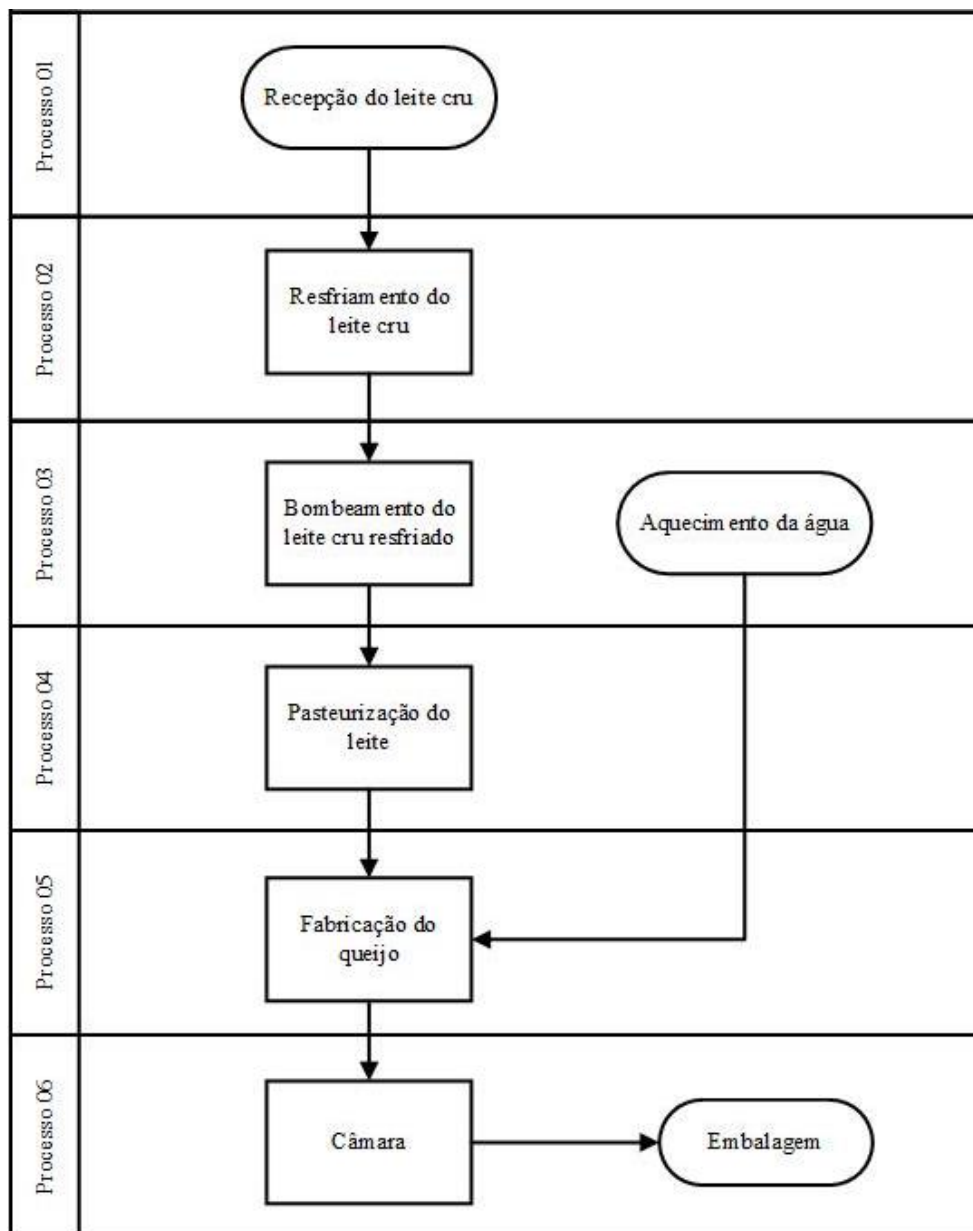
1.2.1 Processo da queijaria

A Figura 4, apresenta o fluxograma do processo de fabricação de queijo, onde aproximadamente 7,3 L de leite cru produzem 1 kg de queijo. São processados mensalmente 8.760 L de leite para a produção de 1.200 kg de queijo, sendo produzidos queijos tipo colonial.

Tal como indicado na Figura 4, o processo 01 consiste na recepção do leite reservados em recipientes denominados tarros. O leite cru é transferido dos tarros para um tanque de resfriamento de 1.000 L no qual é mantido até atingir temperatura de 3 °C (Processo 02). Após atingir a temperatura desejada é bombeado (Processo 03) até o tanque de recepção de leite cru de 1.000 L e durante esse processo é iniciado o

aquecimento da água, que será necessária no processo de fabricação do queijo. A água é aquecida em um tanque de 150 L utilizando-se de um fogareiro tipo CF de alumínio.

Figura 4 – Fluxograma do processo de fabricação de queijo.



Fonte: Autor (2018).

Do tanque de recepção de leite cru, o leite é bombeado para um outro cômodo até o pasteurizador, funcionando a 500 L/h, que opera a temperatura de 75 °C por 20 s (Processo 04).

O leite pasteurizado é transferido para um tanque de 1.000 L no qual é agitado e aquecido até 35 °C para início da fabricação dos queijos (Processo 05). Após atingir a

temperatura desejada adicionam-se os ingredientes requeridos segundo a formulação do produto e deixa-se a mistura em repouso por 30 min.

Após o tempo de pausa são iniciados procedimentos de retirada de 40% do soro, bombeado para um tarro, picagem da massa e inicia-se o bombeamento de água previamente aquecida do tacho em um processo contínuo e moderado, até atingir a temperatura de 42 °C. Cessa-se o bombeamento de água e mistura-se a massa durante 25 min. Posteriormente, deixa-se a massa estabilizar e baixar, e mais uma vez faz-se o bombeamento para o tarro do soro excedente. Após a retirada do soro, adiciona-se sal e é iniciado o processo de enformar e prensar o queijo, permanecendo por um período de 3 h enformados.

Após prensagem os queijos são levados para a câmara fria (Processo 06), onde permanecem por dois dias no processo de maturação para depois serem embalados a vácuo e posteriormente, comercializados.

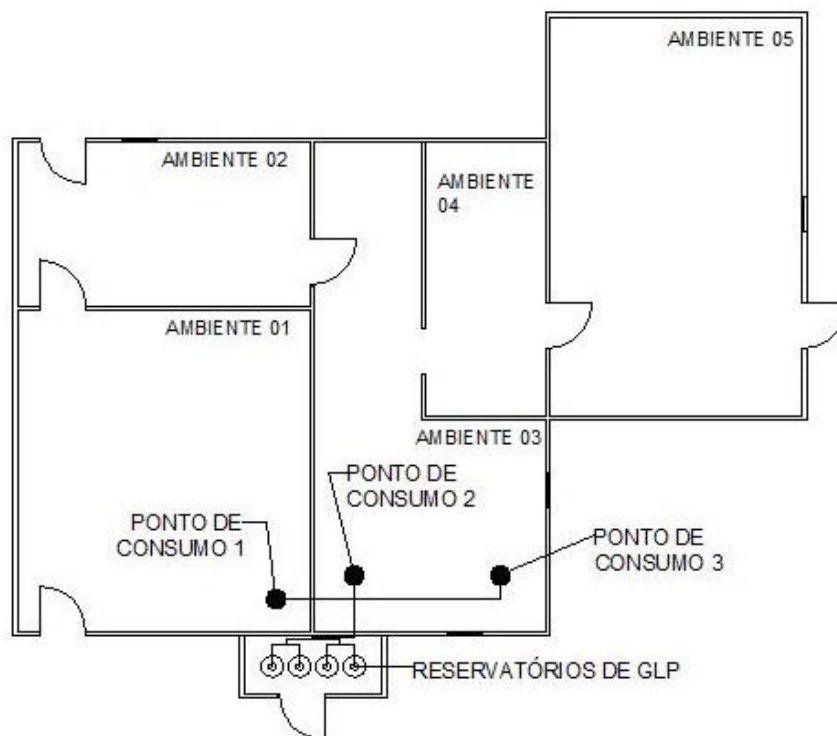
1.2.2 Demanda e rede de suprimento de gás para queijaria

Para realizar as etapas de aquecimento previamente descritas, a queijaria dispõe de um sistema de suprimento de gás liquefeito de petróleo (GLP) composto por uma central de gás, onde são armazenados quatro cilindros de 13 kg de GLP, uma rede de canalizações que leva o gás combustível da central até os pontos de consumo indicados na Figura 5, e duas válvulas reguladoras de pressão (pressão de entrada: 150 kPa, pressão de saída: 2,8 kPa e vazão de 5 kg/h de GLP) instaladas entre dois cilindros de GLP.

O ponto de consumo 1 configura-se no abastecimento do fogareiro tipo CF, utilizado para o aquecimento de água no Processo 03 indicado na Figura 4. O ponto de consumo 2 se refere ao ponto de aquecimento do tanque de 1000 L onde ocorre a fabricação do queijo (Processo 05). E o ponto de consumo 3 está localizado num tanque adicional, destinado ao processo de fabricação de outro produto, queijo tipo muçarela, o qual atualmente encontra-se inativo.

O fogareiro CF em alumínio consome 850 g de GLP por hora, sendo que a sua ocorrência de uso na queijaria é de 3 dias por semana em um total de cinco horas por dia, totalizando consumo de 12,75 kg de GLP por semana. O queimador de GLP (ponto de consumo 2 da Figura 5), é usado durante uma hora por dia na ocorrência de 3 dias por semana, ocorrendo um total de consumo de oito botijões de gás de 13 kg ao longo de um mês.

Figura 5 – Esquema representativo da rede de gás GLP instalada. Onde o ambiente 01, ocorrem os Processo 01, 02 e 03 esboçado na Figura 3, ambiente 02 é o lavabo, ambiente 03 ocorrem os Processos 04 e 05, ambiente 04 é um pequeno depósito e o ambiente 05 ocorre o Processo 06.



Fonte: Autor (2018).

Neste trabalho avaliou-se o potencial de substituição do GLP por biogás para atender a demanda do ponto de consumo 1 apenas, tal como solicitado pelo proprietário do objeto de estudo.

A rede de gás (GLP) atualmente instalada na queijaria (antes da ligação do biogás) respeita as normas estabelecidas pelos bombeiros (IN 008 – Instalação de gás combustível (GLP e GN) (SANTA CATARINA, 2018), utilizando parâmetros como tubos de cobre para redes de gás, flexíveis sem costura com chicotes, instaladas em altura mínima de 100 cm do piso externo dispondo de válvula de corte. Para a condução do biogás do biodigestor até o local de consumo, no caso a queijaria, foi instalada uma tubulação em PVC de dimensões de 20 mm de diâmetro por 12 m de comprimento, sendo que essa foi enterrada.

1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o potencial de aplicação do biogás produzido a partir de dejetos de gado leiteiro em um biodigestor localizado em uma

propriedade rural do município de Araranguá/SC como fonte alternativa de energia em uma queijaria visando à substituição parcial do GLP.

Para isso, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- . Caracterizar quimicamente o biogás;
- . Caracterizar energeticamente o biogás;
- . Avaliar a composição dos gases de exaustão da queima do biogás;
- . Avaliar o potencial de substituição parcial do GLP na queijaria anexa ao biodigestor;
- . Relacionar normas técnicas aplicáveis à utilização do biogás em substituição ao GLP, bem como os requisitos para tal aplicação.

2 METODOLOGIA

2.1 Operação do biodigestor

Em função da rotina já praticada na propriedade rural na qual o objeto de estudo está localizado, o tempo de retenção hidráulica (TRH) do biodigestor avaliado foi de 15 dias, sendo a alimentação do biodigestor uma mistura diluída na proporção 1:1 (dejetos de gado bovino leiteiro e água), a fim de facilitar o fluxo normal de carga e descarga (simultâneos).

O biogás produzido foi caracterizado nos seguintes intervalos de tempo ao longo de um TRH a partir do dia 0, quando o biodigestor foi alimentado com 1.000 L de dejetos misturados a igual volume de água, totalizando carga de 2.000 L. O intervalo de tempo 1 correspondeu a dia 0 até dia 4, o intervalo de tempo 2 correspondeu a dia 4 até dia 9, e o intervalo de tempo 3 do dia 9 até o dia 15. A composição do biogás foi determinada para amostras coletadas imediatamente na saída do gasômetro do biodigestor.

Ao final de cada análise, o biogás presente do gasômetro foi exaurido por completo, retornando para o nível inicial (2 cm) da escala métrica utilizada para monitorar sua elevação, como pode ser observado na Figura 3 (à esquerda), sendo a válvula instalada na tubulação de saída do gasômetro fechada novamente para seu enchimento no intervalo de tempo subsequente. Em cada dia de análise foram registradas a temperatura local e a altura do gasômetro. Em função do estágio em que o projeto se encontrava, o sobrepeso do gasômetro, necessário para pressurizar o biogás na tubulação que o leva até o ponto de consumo, ainda não estava instalado. Dessa forma, considerou-se que o biogás produzido e retido no gasômetro encontrava-se à pressão atmosférica. A partir dos

registros de elevação do gasômetro, das dimensões do biodigestor e do volume de dejetos alimentado determinou-se o volume de biogás produzido e, considerando-se os intervalos de tempo citados, estimou-se a produção diária de biogás, necessária para avaliar o potencial de substituição do GLP no ponto de consumo considerado.

2.2 Caracterização química do biogás

Para determinação da composição do biogás utilizou-se o kit portátil para análise da composição do biogás da Alfakit baseado em método analítico colorimétrico para determinação das concentrações de gás sulfídrico (H_2S) e de amônia (NH_3) e volumétrico para determinação da concentração do gás carbônico (CO_2), sendo a concentração de metano (CH_4) obtida por diferença.

Os procedimentos foram seguidos tal como descrito no manual da Alfakit (EMBRAPA, 2007), sendo que os processos consistiram no biogás entrando em contato com reagentes e mudando a coloração desses ou os reagentes alterando o volume da solução.

Para o método analítico colorimétrico foram usadas cartelas (ilustradas na Figura 6) que apresentam resultado em ppmV em base úmida, a 25 °C e 1 atm de pressão, para outras temperaturas o manual da Alfakit (EMBRAPA, 2007) disponibiliza tabelas com variação da concentração dos compostos (NH_3 e H_2S) em função da temperatura.

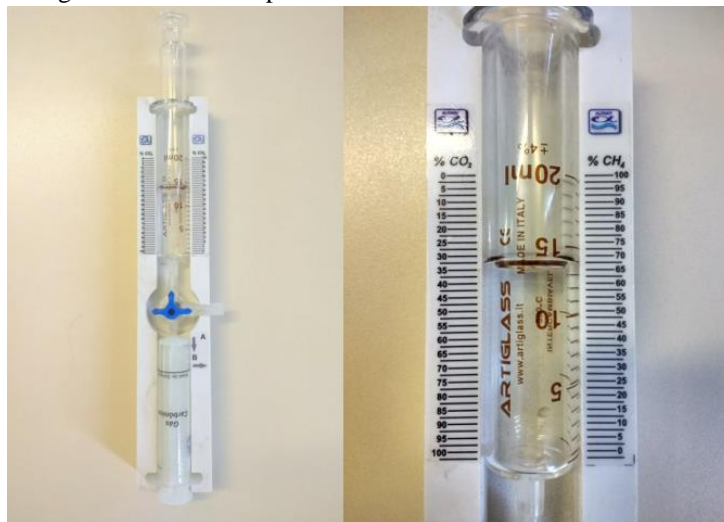
Figura 6 – Fotos das cartelas para análise colorimétrica.



Fonte: Autor (2018).

Para o método analítico volumétrico realizou-se a leitura direta do volume de solução na escala fixada no suporte analítico (ilustrado na Figura 7), que indica a porcentagem de gás carbônico e, por diferença, a de metano.

Figura 7 – Foto do suporte de análise do CO₂ e de CH₄.



Fonte: Autor (2018).

Utilizou-se o software Origin 6.1, função *one-way* ANOVA, para analisar estatisticamente os resultados da caracterização química do biogás. Assumiu-se nível de significância de 0,05 nessa análise.

2.3 Caracterização energética do biogás

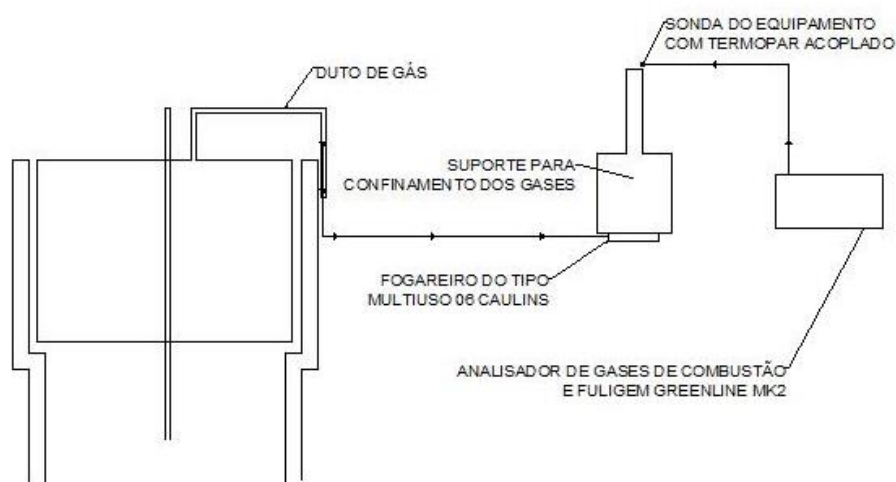
A partir dos resultados da caracterização química do biogás realizou-se o cálculo de PCS e PCI utilizando-se as equações 1 e 2, respectivamente. Adicionalmente, calculou-se o PCI a partir da equação estequiométrica da combustão do CH₄, tal como a Equação 3. A partir da porcentagem de CH₄ determinada no biogás, utilizou-se a Figura 1 para obter a densidade relativa do biogás e o número de Wobbe foi calculado por meio da Equação 4.

2.4 Análise dos gases da combustão do biogás

Um teste de combustão do biogás foi realizado a fim de avaliar aspectos básicos da forma de utilização pretendida (substituição parcial do GLP). Esse teste teve duração de

aproximadamente 20 min. Para isso, utilizou-se um Fogareiro do tipo Multiuso 06 Caulins, que foi acoplado à tubulação de saída do gasômetro do biodigestor (ilustrado na Figura 8). A válvula instalada na saída do gasômetro foi totalmente aberta para liberar o biogás para o queimador, sendo necessário colocar sobre peso na parte superior do gasômetro a fim de aumentar a pressão do biogás dado que o sobre peso definitivo ainda não havia sido instalado.

Figura 8 – Sistema de análise dos gases de combustão.



Fonte: Autor (2018).

A composição dos gases de combustão do biogás foram determinada conforme descrito por Virmond (2007) e Virmond (2011) utilizando-se o analisador de Gases de Combustão e Fuligem Greenline MK2 (Eurotron Italian S.r.l.) a partir da imersão da sonda do equipamento, contendo um termopar acoplado, no duto conectado ao fogareiro. O ponto de amostragem estava localizado a uma distância equivalente a 8 (oito) vezes o diâmetro desse duto a partir do fogareiro. A seção de análise do instrumento analisador de gases baseia-se em um grupo de células eletroquímicas equipadas com membranas de difusão seletiva para análise de CO, SO₂, NO, NO₂ e O₂, e peristor para C_xH_y (calibrado como CH₄).

Foram analisadas cinco amostras, sendo os resultados apresentados uma média dos valores de concentração obtidos para cada amostra.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização química do biogás

A primeira análise do biogás ocorreu no dia 4, com a temperatura ambiente de 21 °C e com nível de 114 cm de variação no nível do gasômetro registrada no intervalo do dia 0 ao dia 4, esse sem o sobre peso. A Tabela 3, apresenta os valores obtidos nessa análise. A interpolação de temperatura não foi realizada para a amostra 2 de NH₃ nem para as amostras de H₂S pois os valores obtidos nas análises colorimétricas não apresentaram variação entre as temperaturas de 20 °C e 25 °C nas tabelas apresentadas no manual Alfakit (EMBRAPA, 2007), porém a amostra 1 de NH₃ teve seu valor ajustado para 41 ppmV (mL/m³).

A segunda análise ocorreu no dia 9, com a temperatura ambiente de 21,9 °C e com 103 cm de variação no nível do gasômetro registrada no intervalo do dia 4 ao dia 9 (sem sobre peso). A interpolação de temperatura não foi realizada para a amostra 2 de NH₃ e para as amostras de H₂S pois os valores obtidos nas análises colorimétricas não apresentaram variação entre as temperaturas de 20 °C e 25 °C nas tabelas apresentadas no manual Alfakit (EMBRAPA, 2007). Os resultados obtidos para as amostras 1 e 3 de NH₃ foram ajustados por interpolação em função da temperatura para 171,9 ppmV e 41,9 ppmV, respectivamente.

A terceira análise ocorreu no dia 15, com a temperatura ambiente de 30 °C (medida pelo termopar do analisador de gases de combustão) e com 101 cm de variação no nível do gasômetro registrada no intervalo do dia 9 ao dia 15 (sem sobre peso). A Tabela 3, apresenta os valores obtidos nessa análise. E para uma melhor avaliação, a amostra 4 de CO₂ e CH₄ foi também analisada no dia 15. A interpolação de temperatura não foi realizada para as amostras de NH₃ e para as amostras de H₂S pois os valores obtidos nas amostras colorimétricas não apresentarem variação entre as temperaturas de 25 °C e 30 °C nas tabelas apresentadas no manual Alfakit (EMBRAPA, 2007).

A Tabela 3, apresenta os valores obtidos nessa análise, sendo que para os cálculos das médias foram desconsideradas as amostras que apresentaram valores discrepantes das demais amostras.

Tabela 3 - Resultados da caracterização química do biogás nos dias 4, 9 e 15.

	Amostra/Repetição	1	2	3	4	Média e desvio padrão
Dia 4	NH₃ (ppmV) a 25 °C	45,0	15,0	-	-	30 ± 21,2
	H₂S (ppmV) a 25 °C	40,0	40,0	-	-	40 ± 0,0
	CO₂ (%)	16,0	35,0	20,0	-	18 ± 2,8
	CH₄ (%)	82,5	65,0	80,0	-	81,3 ± 1,8
Dia 9	NH₃ (ppmV) a 25 °C	175,0	85,0	45,0	-	101,7 ± 66,6
	H₂S (ppmV) a 25 °C	40,0	40,0	-	-	40 ± 0,0
	CO₂ (%)	32,5	15,0	32,5	-	32,5 ± 0,0
	CH₄ (%)	67,5	85,0	67,5	-	67,5 ± 0,0
Dia 15	NH₃ (ppmV) a 25 °C	175,0	175,0	175,0	-	175 ± 0,0
	H₂S (ppmV) a 25 °C	40,0	40,0	-	-	40 ± 0,0
	CO₂ (%)	20,0	32,5	37,5	37,5	35,8 ± 2,9
	CH₄ (%)	80,0	67,5	62,5	62,5	64,2 ± 2,9

Fonte: Autor (2018).

Observa-se nos resultados apresentados na Tabela 3 que a concentração de NH₃ diminui progressivamente da amostra 1 para a 3 nas análises realizadas nos dias 4 e 9. Em função disso, no dia 15 foram coletadas amostras sucessivas, que foram analisadas imediatamente para determinação desse parâmetro, o que resultou na ausência da variação previamente descrita, que supõe-se ser devida ao rápido escape de NH₃ da solução devido ao fato de que à pressão atmosférica sua temperatura de ebulição é de -33,34 °C (LINDE, 2015).

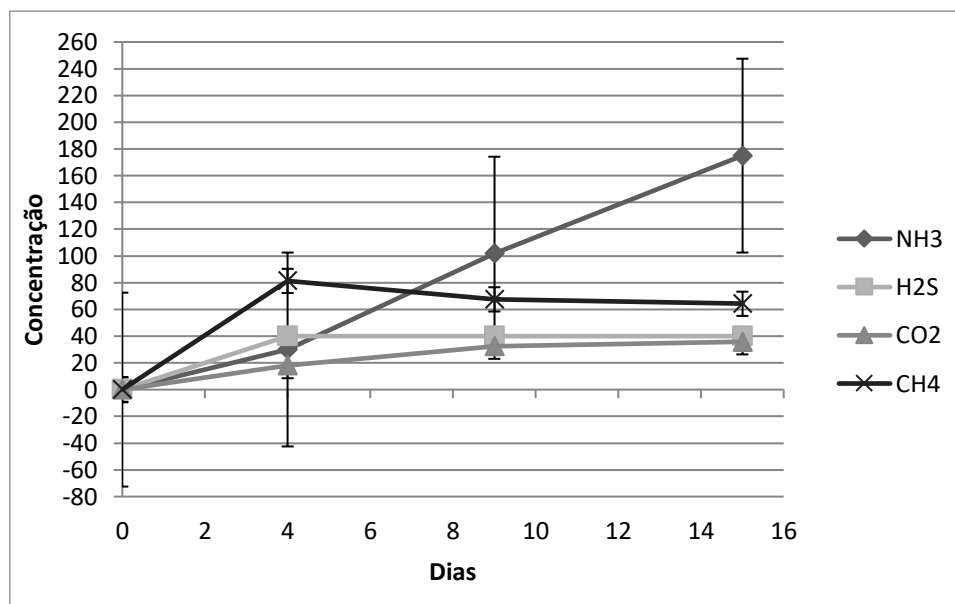
Modificado o método de análise de NH₃, ou seja, priorizada a análise da amônia, com coleta e imediata determinação de sua concentração antes dos demais componentes, constatou-se a estabilidade das concentrações das três amostras, na faixa de 175 ppmV. Observa-se que essa mesma concentração ocorreu na amostra 1 do dia 9, reconhecendo-se assim que o método executado na caracterização do dia 15 é o método correto para obter os valores de concentração da amônia.

A concentração de H₂S não variou entre os dias 4, 9 e 15. Como o CH₄ é obtido da diferença aproximada da porcentagem de CO₂, tomou-se como base a porcentagem de gás carbônico para sua determinação. Os resultados da concentração de CO₂ das amostras 1 e 2 dos dias 4 e 9 apresentaram elevada diferença de valores, incorrendo na necessidade

de realizar a segunda repetição (análise em triplicata). No dia 15, determinação adicional foi realizada (para outra amostra), e essa atestou os valores das determinações anteriores, resultando em concentração média de CO_2 de $35,8\% \pm 2,9\%$ e concentração média de CH_4 de $64,2\% \pm 2,9\%$ (amostra 1 desconsiderada no cálculo dessas médias).

O gráfico 1, representa variação da composição do biogás do dia 0 ao dia 15.

Gráfico 1 – Resultados da caracterização química do biogás nos dias 4, 9 e 15: NH_3 (ppmV a 25°C), H_2S (ppmV a 25°C), CO_2 (%) e CH_4 (%).



Fonte: Autor (2018).

Observa-se no Gráfico 1, visualmente, a estabilização das concentrações de H_2S , CO_2 e CH_4 , e um aumento da concentração de NH_3 de quase cinco vezes do dia 4 para o dia 15. Esse aumento da concentração de H_2S , no entanto, está relacionado ao método de análise desse componente, que teve que ser ajustado tal como previamente descrito, incorrendo em diferença significativa na concentração de NH_3 do dia 4 para o dia 15 ($F=6,88842$ e $p=0,03659$) na análise estatística dos resultados da caracterização química do biogás (Tabela 3). As concentrações de CO_2 ($F=0,31845$ e $p=0,73885$) e CH_4 ($F=0,28244$ e $p=0,76344$) foram estatisticamente iguais entre os dias 4 e 15. Isso indica que o processo de biodigestão não se completou em 15 dias nas condições aplicadas, sendo possível e mesmo necessário aumentar o tempo de retenção hidráulica (TRH) a fim de aumentar o grau de conversão de substrato em biogás e, conseqüentemente, o volume de biogás produzido e a qualidade do fertilizante orgânico.

Ezekoye (2009) descreveu que ao aplicar cromatografia gasosa para analisar a composição do biogás produzido a partir da biodigestão de esterco de vaca encontrou 28,20% de CO₂, 2,8% de CO e 63,3% de CH₄ e outros componentes. Biogás, esse produzido em um biodigestor com capacidade para substrato de 0,971 m³, onde o volume do biogás produzido foi de 1,510 m³ após período de 70 dias. A pasta de esterco de vaca foi obtida por diluição de dejetos na proporção de 1:2 (resíduos:água). Mesmo com a proporção de diluição diferente do biodigestor objeto desse estudo, constata-se que a concentração de CH₄ no biogás produzido foi similar à encontrada neste trabalho.

3.2 Caracterização energética do biogás

Após a realização da análise química do biogás utilizou-se o teor de CH₄ nas equações 1, 2, 3 e 4 e obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Caracterização energética do biogás.

Propriedades	Biogás
Composição em volume (% , 24,3 °C)	CH ₄ (71,0 ± 9,1) CO ₂ (28,8 ± 9,5)
PCS obtido pela Equação 1 (MJ/Nm³)	6,75
PCI obtido pela Equação 2 (MJ/Nm³)	6,01
PCI obtido pela Equação 3 (MJ/m³)	25,42
Densidade relativa obtida a partir da Figura 1	0,83
Índice de Wobbe obtido pela Equação 4 e usando o valor de PCI estimado pela Equação 2 (MJ/Nm³)	6,59
Índice de Wobbe obtido pela Equação 4 e usando o valor de PCI estimado pela Equação 3 (MJ/Nm³)	27,88
Índice de Wobbe obtido pela Figura 1 (MJ/Nm³)	30,00

Fonte: Autor (2018).

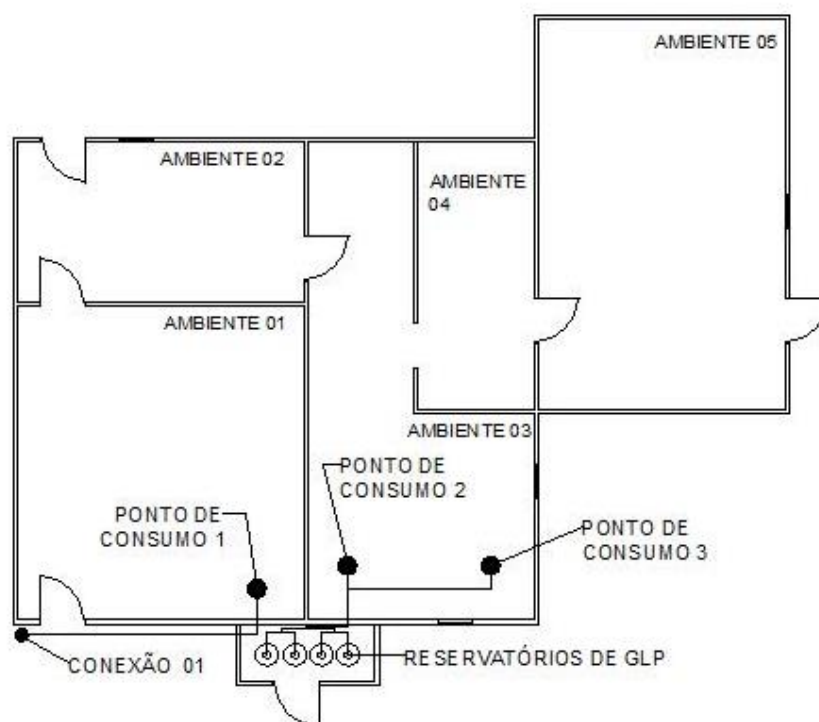
Como observado, quando aplicado os valores da Tabela 4 na Equação 4 o índice de Wobbe obtido foi menor que aquele obtido pela Figura 1. Essa diferença pode estar

relacionada à não análise de outros componentes (CO , H_2 , C_2H_2 , C_2H_4 apresentados nas Equações 1 e 2) que contribuem para o aumento do valor de PCS e PCI. Embora os dados das Tabelas 1 e 2 tenham sido obtidos a $15\text{ }^\circ\text{C}$ e 1 atm, os dados apresentados na Tabela 4 são considerados nas condições normais de temperatura e pressão ($0\text{ }^\circ\text{C}$ e 1 atm), podendo-se assim realizar comparações aproximadas. O índice de Wobbe obtido pela Equação 4 equipara-se ao índice de Wobbe obtido pela Figura 1, mas esses são cerca de 40% menor que os valores de índices de Wobbe do gás natural reportados na Tabela 1, portanto, o biogás apresenta desempenho energético inferior ao gás natural. Comparativamente ao GLP (Tabela 1), verifica-se que o índice de Wobbe do biogás é aproximadamente duas a três vezes menor que o do GLP, logo, verifica-se que o biogás apresenta desempenho energético inferior ao GLP também. O PCI do biogás, estimado pelo método de Dulong e apresentado na Tabela 4, é inferior ao apresentado na literatura para biogás e reportado na Tabela 2 (17 MJ/kg), porém, utilizando-se também o método de Dulong para estimar o PCI do biogás caracterizado na Tabela 3, considerando-se somente o teor de CH_4 (60%), chegou-se ao valor de 5,1 MJ/kg, o que confirma a limitação desse método previamente citada, o que é sustentado por Lima e Passamani (2012), que afirmam que o poder calorífico do biogás está diretamente relacionado com a concentração de CH_4 existente na mistura gasosa, ou seja, quanto mais elevada a porcentagem de CH_4 presente no gás mais energético ele se torna. A densidade do biogás, da mesma forma que o PCI, é dependente da composição do biogás, o que é notável na comparação da densidade do biogás produzido (0,83) com aquela reportada na Tabela 2 (1,2).

3.3 Potencial de substituição parcial do GLP

Considerou-se neste trabalho a substituição de GLP no ponto de consumo 1 representado na Figura 5, no qual encontra-se instalado o fogareiro CF. Esse é um processo menos crítico comparado aos outros dois (pontos de consumo 2 e 3), de forma que uma eventual interrupção do suprimento de combustível não implicaria em prejuízos ao processo de fabricação do queijo. Assim, a proposta de adaptação da rede de gás da queijaria é a permanência dos quatro botijões de gás, os quais continuarão alimentando pontos de consumo 2 e 3 da queijaria, e a canalização do biogás para alimentar somente o fogareiro CF instalado no ponto de consumo 1, representado na Figura 9.

Figura 9 – Esquema representativo da rede de gás GLP modificada com a inserção da conexão do biogás.



Fonte: Autor (2018).

Como indicado na Figura 9, a conexão 01 corresponde à junção da tubulação proveniente do biodigestor ao ponto de consumo 1.

Tal como descrito por Otenio (2015), a produção de biogás varia entre 0,5-0,7 m³ biogás/dia por m³ de biomassa (volume do biodigestor), ou seja, um biodigestor com 100 m³ de volume, teria potencial para gerar entre 50-70 m³ biogás/dia. No entanto, essas taxas são variáveis pois os fatores determinantes são o tipo de biodigestor, qualidade do substrato alimentado, determinada pela composição da alimentação do animal. No caso dos dejetos alimentados ao biodigestor em estudo, a alimentação do gado é composta por 5 kg de ração, 7 kg de feno verde ou pasto e 19 kg de silagem).

O ponto de consumo 1, como descrito anteriormente, necessita 12,75 kg de combustível por semana, ou seja, 10,9 m³ num período de 15 dias (TRH avaliado).

A partir dos registros de variação da altura do gasômetro determinou-se o volume de biogás produzido e, considerando-se os intervalos de tempo citados, estimou-se a produção diária de biogás, necessária para avaliar o potencial de substituição do GLP. Os volumes de biogás medidos nos dias 4, 9 e 15 (volume não acumulativo) foram, respectivamente, 3 m³, 2,84 m³ e 2,77 m³, totalizando 8,61 m³ no TRH avaliado (15 dias). A produção média diária calculada foi de 0,574 m³/dia. Relacionando-se essa taxa de

produção com o consumo de GLP que ocorre no ponto 1 indicado na Figura 5 e com dados da literatura, (equivalência energética de 1 m³ de biogás corresponde a 0,572 m³ de GLP) na condição avaliada de 29% da capacidade nominal de processamento do biodigestor, tal como descrito por Pereira (2018), não foi produzida quantidade necessária de biogás para substituir totalmente o GLP no ponto de consumo 1 da queijaria, mas apenas cerca de 45% dessa demanda. No entanto, a produção de dejetos da propriedade, determinada por Pereira (2018) é de 1.750 L (1,75 m³) a cada 15 dias. Se todo esse volume for processado, utilizar-se-á 50% da capacidade nominal de processamento do biodigestor e a produção de biogás será de 14,85 m³ em 15 dias. Pela equivalência energética entre GLP e biogás, a produção de 14,85 m³ de biogás suprirá o equivalente a 8,49 m³ de GLP, portanto, nota-se que essa produção de biogás ainda não será suficiente para suprir toda a demanda no ponto de consumo 1. Entretanto, ressalta-se que há possibilidade de aumentar ainda mais o volume de biomassa processado no biodigestor estudado dado que seu volume é de 7 m³, havendo ainda potencial para incrementar a produção de biogás.

A IN 008 – Instalação de gás combustível (GLP e GN) (SANTA CATARINA, 2018), estabelece e padroniza critérios de concepção e dimensionamento da instalação de gás combustível. A instrução técnica prevê altura de instalação mínima de 100 cm do piso externo, o uso de tubo de cobre para tubulações de condução do gás, existência de válvulas, registros e medidores de gás, normativas já aplicadas na rede atual.

Além disso, essa normativa determina que para a condução de gás são admitidos matérias como tubo de aço, tubo de cobre, tubo de polietileno (PE80 ou PE100), tubo multicamadas, mangueiras flexíveis (para interligação entre pontos) e tubos metálicos. No entanto, as tubulações de polietileno, são somente recomendadas em redes externas à edificação, e as tubulações multicamadas, para redes de distribuição de gás secundárias. As tubulações de polietileno (PE80 ou PE100) devem ser enterradas a 60 cm de profundidade, envelopadas com concreto ou sobreposição de placas de concreto com dimensões de 5x20x50 cm para proteção mecânica da tubulação enterrada. Na queijaria, a situação atual da instalação da tubulação de ligação do biogás, já implementada, é a seguinte: material (PVC 20 mm x 12 m), enterrada a profundidade aproximada de 15 cm, não concretada.

A adaptação da rede deverá seguir normas estabelecidas pelos bombeiros (IN 008 – Instalação de gás combustível (GLP e GN) (SANTA CATARINA, 2018).

Contudo, de acordo com Salomon (2007), a presença de sulfeto de hidrogênio e amônia, mesmo que em baixas concentrações, tornam o biogás corrosivo para materiais

metálicos como o cobre. Nesse sentido, seria aconselhável o uso de tubulações em polietileno ou policloreto de vinila (PVC), recomendado pelo projeto de referência utilizado na construção do biodigestor em estudo, tal como descrito por Pereira (2018), em todo o percurso de escoamento do biogás até o ponto de consumo, pois mesmo após a purificação o biogás ainda pode conter fragmentos de componentes corrosivos.

Todavia, deve-se respeitar a IN 008 e a Instrução Normativa n° 16 (BRASIL, 2015), as quais institui as normas específicas de inspeção e fiscalização sanitária de produtos de origem animal, referentes às agroindústrias de pequeno porte, no presente caso a queijaria. Essa norma, no entanto, não recomenda a utilização de PVC, mas sim de alguns daqueles materiais previamente citados (por exemplo, listados pela IN 008 – Instalação de gás combustível (GLP e GN) (SANTA CATARINA, 2018)), o que remete à possível necessidade de substituição da tubulação atual caso tais requisitos tenham mesmo que ser atendidos.

3.4 Análise dos gases da combustão do biogás

A análise dos gases do teste de combustão do biogás ocorreu no dia 15 do intervalo de tempo avaliado neste trabalho, com temperatura ambiente de 30 °C com a válvula de liberação do biogás em posição totalmente aberta para todas as medições, com fluxo contínuo. Dada a ausência de sobrepeso no gasômetro, foi necessária a modificação do bico do Fogareiro do tipo Multiuso 06 Caulins para se ter maior vazão de biogás, suficiente para funcionamento desse queimador. Em função disso, aconselha-se que o dimensionamento do sobrepeso seja feito de forma a pressurizar suficientemente o biogás até o ponto de consumo 1 e, possivelmente, aumento do diâmetro da abertura do bico do Fogareiro CF para aumentar a vazão de biogás, dado que a pressão desse na rede de suprimento é bem menor do que a de GLP.

Os resultados da análise dos gases produzidos no teste de combustão do biogás foram apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados da análise dos gases da combustão do biogás.

Amostras	O₂ (%)	CO (ppm)	CO₂ (%)	C_xH_y (%)	T (°C)	NO (ppm)	NO₂ (ppm)	SO₂ (ppm)
1	12,7	4157,0	4,6	1,34	573,0	16	1,0	165,0
2	13,5	2179,0	4,1	-	587,0	20	0,0	48,0
3	14,2	2347,0	3,7	-	681,0	20	0,0	40,0
4	12,7	2177,0	4,6	-	687,0	29	1,0	47,0
5	11,4	2351,0	5,3	-	700,0	28	1,0	43,0
Média e	12,9	2642,2	4,5	1,34	645,6	22,6	0,6	68,6
desvio padrão	±1,1	±1,1	±0,6	±0,0	±60,5	±5,6	±0,6	±53,9

Fonte: Autor (2018).

Pela quantificação apresentada na Tabela 5, constatou-se estabilidade da queima do biogás no intervalo de tempo avaliado (aproximadamente 20 min). Observou-se que o aspecto visual da chama teve predominância de coloração azulada, sendo que de acordo com Faria (2010) isso indica a ocorrência de boa combustão. Observou-se que CO foi formado à concentração média de 2642,2 ppm. Sua presença é indicativa de combustão parcial, o que está de acordo com as concentrações medidas de CO₂, O₂ e C_xH_y (dada como CH₄). Na combustão completa do biogás a concentração de O₂ seria menor do que a apresentada, a de CO₂, por sua vez, maior, a de C_xH_y menor e tendendo a zero juntamente com a de CO. O resultado desse teste de combustão foi importante para confirmar a qualidade do biocombustível produzido pois mesmo sem qualquer controle das variáveis do processo de combustão dada a simplicidade do sistema utilizado (ilustrado na Figura 8) reduziu-se a concentração de CH₄ de 71% para 1,34% (amostra 1 da Tabela 5), atingindo-se a temperatura máxima de 700 °C (amostra 2 da Tabela 5).

4 CONCLUSÃO

A caracterização química do biogás indicou concentração média de CH₄ de 71% (v/v), valor esse que indica que há maior probabilidade de um sistema de combustão funcionar com os mesmos injetores, válvulas, pressão de entrada e demais acessórios utilizados para funcionamento com gás convencional, GLP ou gás natural. Porém, mesmo a concentração de metano encontrando-se acima de 70%, vale lembrar que pode haver a necessidade de modificação no queimador ou nos dutos de ligação para aumentar a vazão

de biogás no ponto de consumo. A caracterização química do biogás também indicou a presença de H_2S (40 ppmV) e de NH_3 (175 ppmV), sendo necessário, na continuidade deste trabalho, avaliar o seu efeito na aplicação pretendida bem como a necessidade de se aplicar tratamento ao biogás para redução da concentração desses componentes.

A caracterização energética do biogás indicou que o biogás possui desempenho energético menor comparado ao gás natural e ao GLP, confirmando o que foi encontrado na literatura.

Ao utilizar-se 29% da capacidade nominal de processamento do biodigestor foram produzidos 8,61 m³ de biogás em 15 dias. Considerando-se a equivalência energética entre GLP e biogás, verificou-se que tal volume não supre totalmente a demanda no ponto de consumo 1 da queijaria, que é de 10,9 m³ de GLP em 15 dias, mas apenas cerca de 45% dessa demanda. Entretanto, há possibilidade de aumentar o volume de biomassa processado no biodigestor estudado dado que seu volume é de 7 m³, havendo potencial para incrementar a produção de biogás.

O teste de combustão do biogás demonstrou a qualidade do biocombustível produzido pois constatou-se estabilidade de queima no intervalo de tempo avaliado, observou-se que o aspecto visual da chama teve predominância de coloração azulada, com redução da concentração de CH_4 de 71% para 1,34% mesmo num sistema simples de queima, sem qualquer controle dos parâmetros da combustão.

Dessa forma, qualifica-se o biogás produzido de dejetos de gado leiteiro no biodigestor estudado como aplicável para substituição parcial do GLP na queijaria anexa ao biodigestor.

Não há normas técnicas específicas para o tema biogás, mas como descrito previamente com as devidas modificações pode-se adotar normativas do gás natural. Após verificação das normativas quanto ao uso do gás natural e GLP, e normativa da agroindústria de pequeno porte, constatou-se a possível necessidade de modificação na tubulação atual de ligação do biodigestor à queijaria.

Ressalta-se que a avaliação do biodigestor ocorreu durante a primavera, com temperatura ambiente média de 24,3 °C no período considerado. Sabendo-se que a temperatura é um dos principais fatores que afetam o processo de biodigestão, faz-se necessário, na continuidade deste trabalho, avaliar o desempenho do biodigestor nas outras estações do ano, especialmente em menores temperaturas, a fim de se avaliar o efeito de sua variação sobre a produção de biogás e também sobre sua composição.

Sugere-se ainda, para trabalhos futuros, análise mais aprofundada da viabilização da substituição do GLP por biogás na queijaria, avaliando-se o efeito do tratamento do biogás sobre sua qualidade, bem como complementação da rede de gases seguindo-se as normas aplicáveis.

5 AGRDECIMENTOS

Agradeço à Associação Técnica sem Fronteiras Brasil e aos seus membros pelas contribuições para realização deste trabalho, e à minha orientadora pela paciência, ajuda e pelo carinho durante a realização deste trabalho.

APPLICATION OF USE BIOGAS PRODUCED FROM DAIRY CATTLE AS ALTERNATIVE SOURCE OF ENERGY IN A CHEESE FACTORY.

ABSTRACT

Biodigestion is an effective way of treating effluents from dairy cattle by producing biogas and co-products, such as organic fertilizer. Biogas is a biofuel whose energy application requires observance of factors such as purification need, composition (CH_4 , CO_2 , NH_3 , H_2S), calorific value, Wobbe number, gas pressure, among others, these factors being dependent on the type of conversion system used. The present work analyzed the biogas from a biodigester built under the first project of TsF Brazil in a rural property located in Araranguá/SC, aiming at the application of the biogas in the partial substitution of the liquefied petroleum gas (GLP) used in the dairies annexed to the biodigester. The biogas, besides containing low concentrations of hydrogen sulfide (40 ppmV), presented ammonia concentration of 175 ppmV, ICP of 25.42 MJ / m^3 and Wobbe index of 27.88 MJ / Nm^3 . The preliminary combustion test indicated good quality of the biofuel produced, because even without control of the variables of the combustion process, given the simplicity of the system used, the bluish color of the flame and the reduction of the CH_4 concentration from 71% to 1,34% at a maximum temperature of 700 °C at the sampling point. Therefore, the biogas produced in the system and under the conditions evaluated has the potential for partial replacement of LPG in the application in question.

Key-words: Biodigester; Biogas; LPG replacement.

6 REFERÊNCIAS

ARAÚJO, A. P. C. **Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Uberlândia, UFU. Uberlândia, MG, Brasil. 2017. 42 p. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/20292/3/Produ%C3%A7%C3%A3oBiog%C3%A1sRes%C3%ADduos.pdf>>. Acesso em 9 dez. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13723**: Aparelho doméstico de cocção a gás. Parte 1: Desempenho e segurança. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 58 p.

_____. **NBR 16560**: Biogás e biometano – Determinação de siloxanos por cromatografia em fase gasosa e amostragem com impingers. Rio de Janeiro: ABNT, 2017a. 12 p.

_____. **NBR 16561**: Biometano – Determinação de siloxanos por cromatografia em fase gasosa e amostragem com tubo de dessorção térmica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017b. 12 p.

_____. **NBR 16562**: Biogás e biometano-Determinação de compostos orgânicos voláteis por cromatografia em fase gasosa e amostragem com tubo de dessorção térmica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 15 p.

_____. **ISO 20675**: Biogas – Biogas production, conditioning, upgrading and utilization – Terms, definitions and classification scheme. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 20 p.

BIASI, C. A. F. et. al. **Energias renováveis na área rural da região sul do Brasil**. 1. ed. Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional, 2018. 202 p. Disponível em: <https://d335luupugsy2.cloudfront.net/cms/files/54738/1528900098eBook_Energias_Renovaveis.pdf>. Acesso em: 16 set. 2018.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Resolução nº 8, de 30 de janeiro de 2015. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2 fev. 2015. Seção 1, p. 100. 2015. Disponível em: <<https://www.jusbrasil.com.br/diarios/85196321/dou-secao-1-02-02-2015-pg-100>>. Acesso em: 01 out. 2018.

_____. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Projeções do agronegócio: Brasil 2017/18 a 2027/28 projeções de longo prazo**. 9. ed. Brasília: MAPA/ACE, 2018a. 112 p. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/projecoes-do-agronegocio/banner_site-03-03-1.png/view>. Acesso em: 16 set. 2018.

_____. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Pecuária de baixa emissão de carbono: tecnologias de produção mais limpa e aproveitamento econômico dos resíduos da produção de bovinos de corte e leite em sistemas confinados**. 1. ed. Brasília: MAPA, 2018b. 88 p. Disponível em: <

<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc/projeto-pecuaria-abc/arquivos-publicacoes/cartilha-carbono-web.pdf>> Acesso em: 28 out. 2018.

_____. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Conceito para o licenciamento ambiental de usinas de biogás**. 1. ed. Brasília: Ministério das Cidades, 2016. 147 p. Disponível em:< http://www.fatma.sc.gov.br/ckfinder/userfiles/galerias/galeria_17/licenciamento-usinas-biogas.pdf >. Acesso em: 18 set. 2018.

COELHO, J. M. **Impactos da participação do biogás e do biometano na matriz brasileira**. In: FÓRUM DO BIOGÁS, 4., 2017, São Paulo. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-244/topico-257/EPE_IV%20FORUM%20BIOGAS_JOSE%20MAURO_2017_1710.pdf>. Acesso em: 16 set. 2018.

DAI, W. et al. A study on the interchangeability of biogas-LPG mixed gases with biogas and LPG qualities. **ICMREE2011 - Proceedings 2011 International Conference on Materials for Renewable Energy and Environment**, v. 1, p. 280–283, 2011. Disponível em: < <https://ieeexplore.ieee.org/document/5930813>>. Acesso em: 10 jun. 2018.

DEGANUTTI, R. et. al. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. Disponível em:<http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000100031&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 07 out. 2018.

EMBRAPA. **Manual de análise biogás**. Brasília: Alfakit LTDA, 2007. 24 p.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations - Statistics Divion, 2016. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QL/visualize>>. Acesso em: 16 set. 2018.

FARIA, M. Biogás produzido em aterros sanitários – aspectos ambientais e aproveitamento do potencial energético. Monografia. Universidade de São Paulo, USP. São Paulo, SP, Brasil. 2010. 87 p. Disponível em: < https://www.al.sp.gov.br/repositorio/bibliotecaDigital/20926_arquivo.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2018.

FNR. **Guia Prático do Biogás Geração e Utilização**. 5. ed. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) e. V. (FNR), 2010 234 p. Disponível em: < http://web-resol.org/cartilhas/giz_-_guia_pratico_do_biogas_final.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2018.

GAHB. **Relatório de biogás e Biometano do Mercosul**. v. 1, n. 1. Foz do Iguaçu: CIBiogás, 2017. 60 p. Disponível em: < https://materiais.cibiogas.org/ebook-relatorio-de-biogas-e-biometano-do-mercopol?utm_campaign=boas_vindas&utm_medium=email&utm_source=RD+Station >. Acesso em: 16 set 2018.

HILSDORF, J. W. **Química tecnológica**. 1. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2015. 340 p.

IEA Bioenergy. The biogas handbook – Science, production and applications. Wood Publishing Limited, 2013. 512p.

IRENA. **Biogas for domestic cooking: technology brief**. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency (IRENA), 2017. 32 p. Disponível em: <<http://www.irena.org/publications/2017/Dec/Biogas-for-domestic-cooking-Technology-brief>>. Acesso em: 01 out 2018.

LINDE. Folha de produto: amoníaco. Lisboa. 2015. 2 p. Disponível em: <http://www.linde-gas.pt/en/images/Amoniac_102015_tcm303-41535.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2018.

MARTINS, E. S. **Sobre fogões adaptados para biogás**. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <elaine.virmond.@ufsc.br> em 22 de junho de 2018. Mensagem recebida por <julianavitoriop@gmail.com> em 22 de junho de 2018.

OTENIO, M. H. Reaproveitamento de água residuária em sistemas de produção de leite. In: MARTINS et. al. Sustentabilidade ambiental, social e econômica da cadeia produtiva do leite: desafios e perspectivas. Brasília: EMBRAPA, 2015. p. 139-159. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1021927/reaproveitamento-de-agua-residuaria-em-sistemas-de-producao-de-leite>>. Acesso em: 28 out. 2018.

PEREIRA, G. S. **Implantação de um biodigestor de baixo custo em uma propriedade com criação de gado leiteiro**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Araranguá, SC, Brasil. 2018. 29 p.

POMPERMAYER, R. S.; JÚNIOR, D. R. P. Estimativa do potencial brasileiro de produção de biogás através da biodigestão da vinhaça e comparação com outros energéticos. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2003, Campinas. Anais eletrônicos...Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000002200000200055&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 02 nov. 2018.

PORPATHAM, E. et al. Effect of compression ratio on the performance and combustion of a biogas fuelled spark ignition engine. **Fuel**, v. 95, p. 247–256, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236111006776>>. Acesso em: 02 set 2018.

RYCKEBOSCH, E. et. al. Techniques for transformation of biogas to biomethane. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 5, p. 1633–1645, 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953411001085>>. Acesso em: 28 ago. 2018.

SALOMON, K. R. Avaliação técnico-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade. Tese

de doutorado. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, MG, Brasil. 2007. 219 p.
Disponível em:< <https://saturno.unifei.edu.br/bim/0032785.pdf>>. Acesso em: 28 out 2018.

SANTA CATARINA. Conselho Estadual do Meio Ambiente de Santa Catarina (CONSEMA). Resolução nº 98, de 5 de maio de 2017. Florianópolis, SC. 2017. 75 p.
Disponível em: <
<http://www.sds.sc.gov.br/index.php/biblioteca/consema/legislacao/resolucoes/654--56/file>>. Acesso em: 21 out. 2018.

_____. Corpo de bombeiros de Santa Catarina (CBMSC). IN 008- Instalação de gás combustível (GLP e GN), de 31 de janeiro de 2018. Florianópolis, SC. 2018. 24 p.
Disponível em:<
http://www.cbm.sc.gov.br/dat/images/arquivo_pdf/IN/2018/IN_008_IGC_31jan2018.pdf>. Acesso em: 01 out. 2018.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Laboratório de Química Ambiental, Combustão e Energia. 2006. Disponível em:<
http://www.usp.br/qambiental/combustao_energia.html>. Acesso em: 5 dez. 2018.

VIRMOND, E. Aproveitamento do lodo de tratamento primário de efluentes de um frigorífico como fonte alternativa de energia. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Florianópolis, SC, Brasil. 2007. 134 p.

VIRMOND, E. Utilização de resíduos agroindustriais com fonte alternativa de energia. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Florianópolis, Brasil. 2011. 272 p.